

复杂网络及其在国内研究进展的综述

刘建香

(华东理工大学商学院 上海 200237)

摘 要 :从复杂网络模型的演化入手,在简要介绍复杂网络统计特征的基础上,对国内关于复杂网络理论及其应用的研究现状从两方面进行综述:一是对国外复杂网络理论及应用研究的介绍,包括复杂网络理论研究进展的总体概括、复杂网络动力学行为以及基于复杂网络理论的应用研究介绍;二是国内根植于本土的复杂网络的研究,包括复杂网络的演化模型、复杂网络拓扑性质、动力学行为,以及复杂网络理论的应用研究等。并结合复杂网络的主要研究内容,对今后的研究重点进行了分析。

关键词 :复杂网络 演化 拓扑 动力学行为

中图分类号 :N941

文献标识码 :A

文章编号 :1005-6408(2009)04-0031-07

0 引言

系统是由相互作用和相互依赖的若干组成部分结合的具有特定功能的有机整体^[1]。而网络是由节点和连线所组成的。如果用节点表示系统的各个组成部分即系统的元素,两节点之间的连线表示系统元素之间的相互作用,那么网络就为研究系统提供了一种新的描述方式^[2,3]。复杂网络作为大量真实复杂系统的高度抽象^[4,5],近年来成为国际学术界一个新兴的研究热点。随着复杂网络逐渐引起国内学术界的关注,国内已有学者开始这方面的研究,其中有学者对国外的研究进展情况给出了有价值的文献综述,而方锦清^[6]也从局域小世界模型、含权网络与交通流驱动的机制、混合择优模型、动力学行为的同步与控制、广义的同步等方面对国内的研究进展进行了简要概括,但是到目前为止还没有系统介绍国内关于复杂网络理论及应用研究现状的综述文献。本文从复杂网络模型的演化入手,在简要介绍复杂网络统计特征的基础上,对国内研究现状进行综述,希望对国内关于复杂网络的研究起到进一步的推动作用。

1. 复杂网络模型的发展演化

网络的一种最简单的情况就是规则网络^[7],它是指系统各元素之间的关系可以用一些规则的结构来表示,也就是说网络中任意两个节点之间的联系遵循既定的规则。但是对于大规模网络而言由于其复杂性并不能完全用规则网络来表示。20 世纪 50 年代末, Erdos 和 Renyi 提出了一种完全随机的网络模型——随机网络(ER 随机网络),它指在由 N 个节点构成的图中以概率 p 随机连接任意两个节点而成的网络,即两个节点之间连边与否不再是确定的事,而是由概率 p 决定。或简单地说,在由 N 个节点构成的图中,可以存在条边,从中随机连接 M 条边所构成的网络就叫随机网络。如果选择 $M = p$,这两种构造随机网络模型的方法就可以联系起来。规则网络和随机网络是两种极端的情况,对于大量真实的网络系统而言,它们既不是规则网络也不是随机网络,而是介于两者之间。1998 年, Watts 和 Strogatz^[8]提出了 WS 网络模型,通过以概率 p 切断规则网络中原始的边并选择新的端点重新连接

收稿日期 :2009-01-05

作者简介 :刘建香(1974—),女,华东理工大学商学院讲师,研究方向:系统工程。

E-mail :jxliu@ecust.edu.cn

构造出一种介于规则网络和随机网络之间的网络——小世界网络（‘small-world’ networks）。显然，当 $p=0$ 时，相当于各边未动，还是规则网络；当 $p=1$ 时就成了随机网络。小世界网络模型的理论分析表明，其节点的度分布（degree distribution）服从指数分布，而实证结果表明，大多数大规模真实网络的节点度用幂律（power-law）分布来描述更加精确。1999 年，Barabasi 和 Albert^[9]提出了 BA 网络模型，在网络的构造中引入了增长性和择优连接性。增长性指网络中不断有新的节点加入进来，择优连接性则指新的节点进来后优先选择网络中度数大的节点进行连接。BA 网络是无标度网络（scale-free networks）模型，其节点度服从幂律分布。除了经典的小世界网络模型和无标度网络模型之外，也有学者提出了一些其他的网络模型来描述真实的网络系统。如 Barabasi, A. 建立的确定性无标度网络模型^[10]，Francesc Comellas 和 Michael Sampels 建立的确定性小世界网络模型^[11]以及 Fan 等考虑某些现实网络具有局域特性而建立的多局域世界演化网络模型^[12]等等。

2. 复杂网络的统计特征

2.1 平均路径长度 L

在网络中，两点之间的距离为连接两点的 shortest 路径上所包含的边的数目。网络的平均路径长度指网络中所有节点对的平均距离，它表明网络中节点间的分离程度，反映了网络的全局特性。不同的网络结构可赋予 L 不同的含义。如在疾病传播模型中 L 可定义为疾病传播时间，交通网络模型中 L 可定义为站点之间的距离^[13]等。

2.2 聚集系数 C

在网络中，节点的聚集系数是指与该节点相邻的所有节点之间连边的数目占这些相邻节点之间最大可能连边数目的比例。而网络的聚集系数则是指网络中所有节点聚集系数的平均值，它表明网络中节点的聚集情况即网络的聚集性，也就是说同一个节点的两个相邻节点仍然是相邻节点的概率有多大，它反映了网络的局部特性。

2.3 度及度分布

在网络中，节点的度是指与该节点相邻的节点的数目，即连接该节点的边的数目。而网络的度 $\langle k \rangle$ 指网络中所有节点度的平均值。度分布 $P(k)$ 指网络中一个任意选择的节点，它的度恰好为 k 的概率。

2.4 介数

包括节点介数和边介数。节点介数指网络中所有

最短路径中经过该节点的数量比例，边介数则指网络中所有最短路径中经过该边的数量比例。介数反映了相应的节点或边在整个网络中的作用和影响力。

2.5 小世界效应

复杂网络的小世界效应是指尽管网络的规模很大（网络节点数目 N 很大），但是两个节点之间的距离比我们想象的要小得多。也就是网络的平均路径长度 L 随网络的规模呈对数增长，即 $L \sim \ln N$ 。大量的实证研究表明，真实网络几乎都具有小世界效应。

2.6 无标度特性

对于随机网络和规则网络，度分布区间非常狭窄，大多数节点都集中在节点度均值 $\langle k \rangle$ 的附近，说明节点具有同质性，因此 $\langle k \rangle$ 可以被看作是节点度的一个特征标度。而在节点度服从幂律分布的网络中，大多数节点的度都很小，而少数节点的度很大，说明节点具有异质性，这时特征标度消失。这种节点度的幂律分布为网络的无标度特性。

3. 国内对复杂网络理论及应用研究现状的概括性介绍

3.1 复杂网络理论研究进展的介绍

国内学者对国外复杂网络理论研究的介绍最早始于汪小帆（2002）发表在国外杂志上的一篇文章^[14]，文中回顾了近年来国外复杂网络研究所取得的重要成果，其中包括平均路径长度、聚集系数、度分布等网络度量，Internet、WWW 和科学合作网络等现实系统，规则网络、随机网络、小世界网络、无标度网络等网络模型，以及复杂网络上的同步等。而在国内刊物上对国外复杂网络理论研究的介绍可追溯到朱涵（2003）^[15]在《物理》杂志上发表的“网络‘建筑学’”，文章以小世界、集团化和无标度等概念为中心，介绍了复杂网络的研究进展。之后，吴金闪等^[16]从统计物理学的角度总结了复杂网络的主要研究结果，对无向网络、有向网络和加权网络等三种不同网络统计性质研究的现状分别作了综述，对规则网络、完全随机网络、小世界网络和无标度网络等网络机制模型进行了总结，并对网络演化的统计规律、网络上的动力学性质的研究进行了概括。周涛等（2005）围绕小世界效应和无标度特性等复杂网络的统计特征及复杂网络上的物理过程等问题，概述了复杂网络的研究进展。刘涛等^[17]从平均路径长度、聚集系数、度分布等复杂网络的统计性质，小世界网络和无标度网络等网络模型等层面简述了复杂网络领域的相关研究。史定华^[18]从对

网络节点度和度分布的理解入手,对网络分类、网络的演化机理和模型及结构涌现等方面取得的进展进行了总结。

总的来说,这些介绍都突出了对复杂网络上的统计性质、复杂网络经典模型的阐释和描述,对复杂网络理论在国外研究进展的介绍试图全面但却较为笼统。

3.2 复杂网络动力学行为研究的介绍

一般将建立在网络上的系统动态性质称为网络上的动力学行为。研究复杂网络的拓扑结构也是为了理解和解释发生在网络上的动力学行为或过程。赵明等^[19]总结了近年来复杂网络上动力学系统同步的研究进展,主要包括复杂网络同步的稳定性分析,复杂网络上动力学系统同步的特点,网络的几何特征量对同步稳定性的影响等。另外,由于复杂网络中的社区发现成为近几年复杂网络领域的一个研究热点,王林(2005)等全面综述了社区结构的性质以及社区发现的若干算法等。鲁棒性作为复杂系统的一种属性,已经成为人们关注的一个热点。接婧^[20]对鲁棒性在国际学术界的研究状况进行了介绍,包括鲁棒性的定义、鲁棒性的特点、鲁棒性的研究方向及鲁棒性的应用等。在对复杂网络展开的研究中,有一类应用性很强的网络行为日益引起人们的关注,如计算机病毒在计算机网络的传播、传染病在人群中的流行、信息或谣言在社会中的扩散等等,实际上它们都表现为一种网络上的传播。周涛等^[21]对复杂网络上传播动力学的研究进行了综述,讨论了小世界网络和无标度网络的传播特性以及相应的网络免疫技术。

复杂网络上的动力学行为涉及面非常广泛,如渗流、传播、网络搜索、相变等等,而与网络拓扑结构的研究相比,这些领域的研究进展相对缓慢,因此国内关于这些领域研究的介绍也就相对较少。

3.3 基于复杂网络理论应用研究的介绍

近几年由于随着复杂网络理论的迅速发展,其理论方法在真实网络的研究也得到广泛的应用。生物学的研究表明,大多数生物功能都是由许多细胞分子相互作用共同完成的。因此,对多种分子的相互作用网络进行分析,理解细胞内复杂的网络结构和动力学,对研究生物的功能具有重要作用。王冰等^[22]介绍了国外应用复杂网络理论研究代谢网络的进展情况,主要包括代谢网络的小世界和无标度特性,以及网络的子集团和功能。互联网是一个典型的复杂网络,由于计算机病毒在互联网上的传

播,其安全性问题正日益受到关注,而网络的拓扑结构对于病毒的传播行为有着十分重要的影响,不同的网络拓扑结构中传播行为呈现出不同的特性。许丹等^[23]围绕计算机病毒在互联网上的传播,对已有的研究成果进行了回顾。介绍了包括流行病学模型、电子邮件病毒传播模型、随机常数传播模型和间隔模型等在内的计算机病毒传播模型,计算机病毒在不同网络中的传播所表现出的不同性质,以及病毒传播机制对网络拓扑结构的影响等。

复杂网络理论在现实系统中应用的范围非常广泛,涉及到社会、生物、技术、经济等许多领域,如演员合作网、科研合作网、代谢网、电话网、Internet、WWW、商业网络^[7,24-26]等等,而在国内对这些研究结果的介绍还相对较少。

4. 国内复杂网络研究的进展

4.4 复杂网络的演化模型

Barabasi 和 Albert 给出的构造无标度网络的演化模型(BA 网络模型),把真实系统通过自组织生成无标度的网络归功于两个主要因素:增长性和择优连接性。李翔等^[27]认为择优连接机制不会在整个网络上都起作用,而只会在某个局域世界里发挥作用,作者通过引入局域世界的概念对 BA 网络模型进行了推广,提出了局域世界演化网络模型。研究表明,该模型保持了无标度网络的鲁棒性,同时改善了无标度网络固有的面对恶意攻击的脆弱性。陈庆华等^[28]为了进一步研究无标度网络的增长性和择优连接性,通过对网络节点进行重新连接建立了 BA 网络模型的两个拓展模型。章忠志等^[29]提出了 BA 网络的一个等价的演化模型,在系统增长的过程中,新节点总是与网络中随机选择的边所关联的节点进行连接。并利用平均场方法,解析计算了网络节点度分布和聚集系数,并对网络的平均路径长度进行了数值模拟。结果表明,其演化成的结构特性与 BA 网络相同。陈禹等^[30]认为 BA 模型虽然比较准确地把握了现实世界中网络最基本的特点,较好地解释了无标度网络的形成机制,但是它对于现实的情况过于简化,为了对现实的复杂网络进行更深入的研究,作者考虑了三个方面的因素:进行择优连接时的搜索成本和建立新连接的成本;发展过程中有些连接会发生变化;网络初始状态的影响等,并在此基础上建立了 BA 网络的三种扩展模型。实验结果表明,在考虑了这些因素后,BA 模型的基本结论没有变化。除此之外,也有学者提出了

其他一些网络模型,如权重演化网络模型^[31]、领域演化网络模型^[32]、确定性小世界网络模型^[33]等。

总结起来,这些复杂网络模型大多是在 BA 网络拓扑结构的基础上通过新的断点重连而建立的,通过这些模型的建立试图更确切地反映真实的网络世界。

4.5 复杂网络特性、行为及演化研究

在我们现实生活中存在着大量的复杂网络,如信息网、交通网、电力网等等,这些网络与我们日常生活密切相关,因此这就需要我们深入研究复杂网络的拓扑结构、动力学行为和演化机制等,以便我们更好地设计这些复杂网络和控制他们的行为。大多数大规模真实网络都具有无标度特性。在无标度网络中,存在极少数具有大量连接的“核心节点”和大量具有少量连接的“末梢节点”,这样的网络是非同质的,这是网络涌现出的一种“序”。谭跃进等^[34]提出了网络结构熵的概念,并用它来定量地度量这种“序”。李昊等^[35]就具有幂律度分布的复杂网络的平均路径长度进行了研究,并针对因特网给出了计算平均路径长度的公式。

同步是一种非常普遍而重要的非线性现象。网络拓扑和单个节点的动力学性质决定整个网络的动力行为——网络同步。吕金虎等^[36,37]基于时不变复杂动力网络模型,给出了时不变网络的周期轨道同步、时变网络的非混沌同步和混沌同步的充分必要条件。同时证明了:一个时不变复杂动力网络的同步完全由该网络的内部耦合矩阵和网络的耦合框架矩阵的特征根决定,而一个时变复杂动力网络的同步完全由该网络的内部耦合矩阵和网络的耦合框架矩阵的特征根及其对应的特征向量所决定。抗毁性是指网络拓扑结构的可靠性。复杂网络通常面临随机性打击和选择性打击,随机网络和无标度网络对这两种损伤的抗毁性有很大差异。吴俊等^[38]针对复杂网络的特点,给出了复杂网络连通性的一个新测度——连通系数,在此基础上给出了抗毁性测度的新定义,针对复杂网络面临的两种不同损伤,给出了复杂网络抗毁性的两个新测度——容错度和抗攻击度。高亮等^[39]对食物链网络在节点攻击和边攻击下的鲁棒性进行了研究,实验发现,对于大多数食物链网络节点介数攻击的效果优于节点度攻击,且以相同的边移除率为标准,边介数攻击的效果明显优于节点攻击。复杂系统由于受到内、外干扰因素的作用,使得某一部分崩溃,由此带来的结果直接或间接地影响其他部分,从而引发连

锁的崩溃,最终导致整个复杂系统的崩溃。复杂系统所具有的这一性质称为脆弱性。韦琦^[40]指出脆弱性是复杂系统的一个基本特性,并以子系统之间的脆弱性联系为出发点,建立了研究复杂系统脆弱性的理论基础框架。而林德明等^[41]则应用元胞自动机对复杂社会系统的脆弱性进行了仿真。

杨波等^[42]从个体选择的角度,以网络中个体价值优化作为网络结构演化的动力机制,用节点度分布、平均路径长度、聚集系数作为网络结构演化判据,研究小世界网络的结构演化问题。结果表明,小世界网络结构演化过程是一个鲁棒过程,即与初始状态相比,网络结构不发生大的变化。

随着复杂网络理论研究的进一步深入,网络特征、行为及演化等逐渐引起国内许多学者的关注,他们分别从网络测度、网络同步、网络鲁棒性和脆弱性、网络结构演化等角度对复杂网络加以研究,但与网络拓扑的研究相比,这部分的研究还很薄弱。

4.6 复杂网络理论的应用研究

目前国内关于复杂网络的应用研究主要涉及信息网络、社会、经济管理等领域。王旻等^[43]在论述已有工作的基础上,构建了一个 Internet 的复杂网络模型,对病毒的传播行为进行了仿真研究,结果表明,构建的网络模型真实地反映了 Internet 的特性,通过对某些参数的调整,病毒传播可以得到有效控制。

通信网络可以看成是由成千上万个路由器节点以及节点之间的数百万条通信线路组成的边所构成的复杂网络。实际通信网络经常承受超负荷的流量,导致拥堵的产生。陈振毅等^[44]利用 BA 无标度网络模型来模拟通信网络中的数据传输过程,用节点的容量指标反映实际路由器的缓冲区大小,用节点的处理速度指标来反映路由器处理数据包的能力;同时为了反映现实通信网络中路由器的重要程度不同,用无标度网络中的度指标把节点分为两类,用度较大的中心节点模拟现实网络中重要的路由器,而用其它普通节点模拟一般的路由器。研究结果表明,中心节点的容量和处理速度是导致网络发生拥堵的主要因素,因此可以通过改变这些指标来缓解网络的拥堵。而为了达到给定的控制效果,只需要对中心节点中的几个关键节点进行改善就可以得到满意的效果。

在信息化时代,企业形态和企业之间的相互关系发生巨大变化,动态企业联盟应运而生。动态企

业联盟是基于利益优先的原则,在最大化利益的前提下与一切可能的合作企业结成联盟,因此联盟网络结构既有一定的规律可循,又存在随机性,无法用规则网络或随机网络来表示,而小世界网络模型能恰当地反映联盟结构特征。江可申等^[45]通过构建基于小世界网络的企业动态联盟模型,研究如何在提高网络全局功能的条件下实现企业自身利益最大化。

在一个充满动态而不确定性的环境中,组织以立体连接的方式来处理各种交换关系并协同完成各类组织任务,使组织逐渐呈现出复杂的网络形态,并表现出与社会现实中普遍的复杂网络所共同具有的行为模式及其特征。马骏等^[46]将复杂网络的相关理论应用于组织网络的研究中来,分别从组织网络的表示方法与分析手段之间有效结合、局部互动关系与组织网络的有效性、以及局部与全局演化的动力学特征三个方面,给出了应用复杂网络理论解决组织网络中的相关问题的一些方向。

新产品开发团队是一个组织创新活动的核心。邓丹^[47]通过将团队成员表示为网络节点,团队成员之间的交流连线表示将新产品开发团队抽象成网络,并用小世界的平均路径长度和聚集系统来表征交流网络的交流频率和交流集中度这两个特征参数,对新产品开发团队交流网络进行了分析。

在实证研究方面,周辉^[48]通过对我国广东地区关于 SARS 的流言传播的研究表明,现实社会中流言传播具有小世界网络的典型特性,利用复杂网络的相关理论可以更合理地解释流言传播实际过程中各类流言爆发、迅速传播的潜在原因。陈洁、许田等^[49,50]通过分析搜集到的中国电力网的有关数据,表明中国电力网具有小世界效应和无标度特性。刘杰等^[51]对某个时间段内发表于我国物理学科具代表性的两份权威刊物上的有关混沌科学理论方面的论文作者相互合作研究所形成的复杂网络进行了研究,结果发现,该网络具有比较明显的无标度特性。何阅等^[52]通过对 1536 道中药方剂和 681 种药材的统计,对中药方剂网络的包括平均路径长度、聚集系统、度分布等在内的统计性质进行了研究。

由此看来,随着复杂网络理论研究的进一步深入,其应用研究也在国内蓬勃开展起来。

5. 总结与展望

自 Watts 和 Strogatz(1998)提出小世界网络模型以及 Barabasi 和 Albert(1999)提出无标度网络模

型以来,国际学术界掀起了对复杂网络研究的热潮,许多研究成果陆续问世。Newman 在 429 篇参考文献的支撑下,对这一领域的发展进行了较为全面的概括总结。而在国内,自 2002 年以来陆续有学者对这一领域展开研究,并有相关文章发表,其中很大一部份包括复杂网络模型^[27,28,31-33,53,54]、复杂网络上的动力学行为^[55-61]、复杂网络的应用^[62-66]等内容在内的重要的研究成果是发表在国外刊物上。总的来说,不论从理论研究还是应用研究实证分析方面,国内对复杂网络的研究都还处于刚刚起步阶段,很多还停留在对国外研究成果的介绍上,这也就意味着许多问题还有非常大的空间有待我们进一步的深入探索。针对这种现状,今后一段时间内国内对复杂网络的研究应主要集中在以下几个方面:

(1) 及时跟踪复杂网络理论研究的最新研究趋势和动向,特别是对具体研究内容(如混沌、同步、社区发现等等)最新的研究动向予以较为深入的关注。

(2) 进一步展开对复杂网络理论的研究,包括网络的拓扑结构和网络上的动力学行为及其相互作用,网络度、聚集性、社区结构等网络特性及其这些特性对网络行为的影响,探索新的网络参量和新的统计规律以期对网络结构和网络特性进行更深入的认识。

(3) 在无向网络的基础上,探索有向、加权网络的网络特征和网络行为,并将相应的研究成果应用到实际的网络系统当中。

(4) 针对本国实践,展开真实网络的实证研究。尽管不同的网络都存在共同的小世界效应,但不同的网络有不同的平均路径长度、聚集系数等网络参量,不同的网络拓扑有不同的网络动力学行为。因此应结合真实网络,赋予这些参数实际意义,利用实证分析进行研究,分析它们的变化以及网络的拓扑结构、动力学行为对网络功能的影响,并进一步研究真实网络的演化机制,以设计出更优越的网络。

参考文献

- [1] 钱学森,许国志,王寿云.论系统工程[M].长沙:湖南科学技术出版社,1988:7-22.
- [2] Albert,R., & Barabasi,A.L: Statistical mechanics of complex networks [J]. Review of Modern Physics, 2002,74:47-97.
- [3] Newman M E J: The structure and function of complex networks [J]. SIAM Review, 2003,45:167-256.
- [4] 周涛,柏文洁,汪秉宏等.复杂网络研究概述[J].物理,2005,34(1):31-36.

- [5] 王林,戴冠中:复杂网络中的社区发现——理论与应用[J].科技导报,2005,23(8):62- 66.
- [6] 方锦清.迅速发展的复杂网络研究与面临的挑战[J].自然杂志,2005,27(5):269- 274.
- [7] Reka Zsuzsanna Albert :Statistical mechanics of complex networks [D]. Department of Physics Notre Dame 2001.
- [8] Watts D J & Strogatz S H :Collective dynamics of ‘small-world’ networks[J]. Nature, 1998,393:440- 442 .
- [9] Barabasi A L & Albert R : Emergence of scaling in random networks[J]. Science, 1999,286:509- 512 .
- [10] Barabasi A L ,Ravasz E,Vicsek T :Deterministic scale- free networks[J]. Physica A, 2001, 299: 559- 564.
- [11] Francese Comellas, Michael Sampels :Deterministic small-world networks[J]. Physica A, 2002, 309: 231- 235.
- [12] Fan Z P, Chen, G R :Evolving networks: from topology to dynamics[J]. Journal of Control Theory and Application, 2004, 2: 60- 64.
- [13] 田颖杰,李南,江可申:小世界网络(SWN)及其在经济管理领域的应用[J].世界经济研究,2001,(6):83- 87 .
- [14] Wang Xiaofan :Complex networks: topology, dynamics and synchronization[J].International Journal of Bifurcation and chaos,2002,12(5):885- 916.
- [15] 朱涵,王欣然,朱建阳:网络“建筑学”[J].物理,2003,32(6):364- 369.
- [16] 吴金闪,狄增如:从统计物理学看复杂网络研究[J].物理学进展,2004,24(1):18- 45.
- [17] 刘涛,陈忠,陈晓荣:复杂网络理论及其应用研究概述[J].系统工程,2005,23(6):1- 7.
- [18] 史定华:网络——探索复杂性的新途径[J].系统工程学报,2005,20(2):115- 119.
- [19] 赵明,汪秉宏,蒋品群等:复杂网络上动力系统同步的研究进展[J].物理学进展,2005,25(3):273- 295.
- [20] 接婧:国际学术界对鲁棒性的研究[J].系统工程学报,2005,20(2):153- 159.
- [21] 周涛,傅忠谦,牛永伟等:复杂网络上传播动力学研究综述[J].自然科学进展,2005, 15(5):513- 518.
- [22] 王冰,修志龙,唐焕文:基于复杂网络结构理论的代谢网络结构研究进展[J].中国生物工程杂志,2005,25(6):10- 14.
- [23] 许丹,李翔,汪小帆:复杂网络理论在互联网病毒传播研究中的应用[J].复杂系统与复杂性科学, 2004,1(3):10- 26.
- [24] D.de Linma e Silva : The complex network of Brazilian popular music[J]. Physica A,2004,332:559- 565.
- [25] Luis Lopez,Juan A Almendral, Miguel A F Sanjuan :Complex networks and WWW market[J]. Physica A,2003, 324: 754- 758.
- [26] Wataru Souma, Yoshi Fuiwara, Hideaki Aoyama :Complex networks and economics[J]. Physica A,2003, 324: 396- 401.
- [27] Li X, Chen G R :A local- world evolving network model [J]. Physica A,2003,328:274- 286.
- [28] Chen Q H, Shi D H :The modeling of scale- free networks [J]. Physica A,2004, 335: 240- 248.
- [29] 章忠志,荣莉莉:BA 网络的一个等价演化模型[J].系统工程,2005,23(2):1- 5.
- [30] 陈禹,宗晓,郝杰等:BA 模型的三种扩展[J].系统工程学报,2005,20(2):120- 127.
- [31] Li Ch G, Chen G R :A comprehensive weighted evolving networks[J]. Physica A,2004, 343: 288- 294.
- [32] Cao Y J,Wang G Z, Jiang Q Y, etc :A neighborhood evolving network model [J]. Physics Letters A, 2006, 349: 462 - 466.
- [33] Zhang Zh Zh, Rong L L, Guo Ch H :A deterministic small-world network created by edge iterations [J]. Physica A, 2006,363: 567- 572.
- [34] 谭跃进,吴俊:网络结构熵及其在非标度网络中的应用[J].系统工程理论与实践, 2004,(6):1- 3.
- [35] 李昊,山秀明,任勇:具有幂率度分布的因特网平均最短路径长度估计[J].物理学报,2004,53(11):3695- 3670.
- [36] 吕金虎.复杂动力网络的数学模型与同步准则[J].系统工程理论与实践,2004,(4):17- 22.
- [37] Lv J H, Yu X H, Chen, G R :Chaos synchronization of general complex dynamical networks [J]. Physica A,2004, 334: 281- 302.
- [38] 吴俊,谭跃进:复杂网络抗毁性测度研究[J].系统工程学报, 2005,20(2):128- 131.
- [39] 高亮,李梦辉,吴金闪等.食物链网络在顶点攻击与边攻击下的鲁棒性[J].系统工程理论与实践, 2005,(7):1- 8.
- [40] 韦琦,金鸿章,郭健等:基于脆性的复杂系统研究[J].系统工程学报,2004,19(3):326- 328
- [41] 林德明,金鸿章,靳相伟.基于元胞自动机的复杂系统脆性仿真[J].系统工程学报,2005,20(2):167- 171.
- [42] 杨波,陈忠,段文奇:基于个体选择的小世界网络结构演化[J].系统工程, 2004,22(12):1- 5.
- [43] 王旻,郑应平:病毒在复杂 Internet 网上的传播研究[J].计算机应用,2005,25(11):2524- 2526.
- [44] 陈振毅,汪小帆:无尺度网络中的拥塞及其控制[J].系统工程学报,2005,20(2):132- 138.
- [45] 江可申,田颖杰.动态企业联盟的小世界网络模型[J].世界经济研究,2002 (5):84- 89.
- [46] 马骏,唐方成,郭菊娥等:复杂网络理论在组织网络研究中的应用[J].科学学研究,2005,23(2):173- 178.
- [47] 邓丹,李南,田惠敏:基于小世界网络的 NPD 团队交流网络分析[J].研究与发展管理,2005,17(4):83- 87.
- [48] 周辉:流言传播的小世界网络特性研究[J].武汉科技学院学报,2005,18(1):108- 111.
- [49] 陈洁,许田,何大韧:中国电力网的复杂网络共性[J].科技导报,2004,(4):11- 14.
- [50] Xu T, Chen J, He DY :Complex network properties of Chinese power grid [J].International Journal of Modern

- Physics B, 2004,18:2599- 2603.
- [51] 刘杰,陆君安:一个小型科研合作复杂网络及其分析[J].复杂系统与复杂性科学, 2004 (3): 56- 61.
- [52] 何阅,张培培,唐继英等:中药方剂的合作网络描述[J].科技导报,2005,23(11):36- 39.
- [53] Geng X M, Li Q: Random models of scale- free networks [J]. Physica A,2005,356: 554- 562.
- [54] Hu H B, Wang L: The Gini Coefficient 's application to general complex networks [J].Advances in complex systems, 2005,8: 159- 167.
- [55] Li X: Uniform synchronous criticality of diversely random complex networks [J]. Physica A,2006,359: 827- 834.
- [56] Li X,Chen G R,King- Tim Ko: Transition to chaos in complex dynamical networks[J]. Physica A,2004, 338: 367- 378 .
- [57] Wang X F, Chen, G R: Synchronization in general complex dynamical networks [J]. Physica A,2004, 343: 263- 278 .
- [58] Fan J, Wang X F: On synchronization in scale- free dynamical networks [J]. Physica A,2005, 349: 443- 451.
- [59] Zhang H F,Wu R X, Fu X Ch: The emergence of chaos in complex dynamical networks[J].Chaos, Solitons and Fractals, 2006,28: 472- 479 .
- [60] Wang X F, Chen, G R: Pinning control of scale- free dynamical networks [J]. Physica A,2002, 310: 521- 531.
- [61] Li Ch G, Chen G R: Phase synchronization in small- world networks of chaotic oscillators[J].Physica A,2004, 341:73- 79.
- [62] Li X, Jin Y Y, Chen G R: Complexity and synchronization of the world trade web[J]. Physica A,2003, 328: 287- 296.
- [63] Yang H J, Zhao F C, Li Zh N etc: Modeling SARS spreading on complex networks [J].International Journal of Modern Physics B, 2004,18:2734- 2739.
- [64] Liu J Zh, Wu J Sh,Yang Z R: The spread of infectious disease on complex networks with household- structure[J].Physica A,2004, 341: 273- 280.
- [65] Li X, Chen G R, Li Ch G:Stability and bifurcation of disease spreading in complex networks[J].International Journal of Systems Science, 2004,35:527- 536.
- [66] Shao Zh G, Sang J P, Zou X W etc: Blackmail propagation on small- world networks[J]. Physica A,2005, 351: 662- 670

Complex Network and Review of Domestic Research

LIU Jian- xiang

(School of Business ,East China University of Science and Technology, Shanghai 200237,China)

Abstract: The paper summarizes the study of complex networks and its application in China, includes the following aspects: general review of academic research of complex networks, sum- up of research of dynamical behavior of complex networks, and introduction of application of complex networks in the world; the research of evolving complex networks, topology and dynamical processes on complex networks, and its application in China. And finally, with the main research of complex network, the author analyses the stress of complex network.

Keywords: complex network ;evolving,topology ;dynamical processes